



TITLE:

博士論文概要

AUTHOR(S):

CITATION:

博士論文概要. Cue 2018, 39: 35-54

ISSUE DATE:

2018-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/235639>

RIGHT:

博士論文概要

[課程博士一覧]

縄 田 信 哉	「Design of Electrical Energy Network Based on Power Packetization」 (電力のパケット化による電気エネルギーネットワークの設計)	平成 29 年 3 月 23 日
星 野 光	「Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems」 (地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御)	平成 29 年 3 月 23 日
伊 藤 俊 平	「電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発」	平成 29 年 3 月 23 日
田 中 一	「Theoretical Study on Carrier Transport in Semiconductor Nanowires Based on Atomistic Modeling」 (原子論的モデルに基づく半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理論的研究)	平成 29 年 3 月 23 日
市 川 修 平	「Fundamental Study on Carrier Recombination Processes in AlGaIn-related Materials and their Structural Designs toward Highly Efficient Deep-UV Emitters」 (深紫外発光素子の高効率化にむけた AlGaIn 系半導体の結晶成長とキャリア再結合過程に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
尾 崎 拓 也	「Growth of InGaIn-Based Emitters on ScAlMgO ₄ Substrates for Full Visible Spectral Range」 (可視全域をカバーする発光素子開発のための ScAlMgO ₄ 基板上への InGaIn 系発光層の成長に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
山 口 皓 平	「On Asteroid Deflection Techniques Exploiting Space Plasma Environment」 (宇宙プラズマ環境を利用した小惑星の軌道変更手法に関する研究)	平成 29 年 3 月 23 日
浦 出 芳 郎	「Electromagnetic Properties of Checkerboard-like Metallic Structures at Terahertz Frequencies」 (チェッカーボード状金属構造のテラヘルツ帯における電磁的性質)	平成 29 年 3 月 23 日
大 谷 芳 明	「ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響に関する研究」	平成 29 年 3 月 23 日
松 室 堯 之	「Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission」 (先進的マイクロ波電力伝送に向けた球面波合成による高度ビーム形成)	平成 29 年 3 月 23 日
倪 俊 雄	「Advanced Modeling Techniques for High Performance and Human Centered LED Lighting System」 (高効率で人に優しい LED 照明システムのための先進的モデリング技術の開発)	平成 29 年 3 月 23 日

片岡 研	「深紫外多波長発光素子の実現に向けた AlGaIn 量子井戸三次元微細構造制御に関する研究」	平成 29 年 5 月 23 日
野村 義樹	「Bi 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究」	平成 29 年 7 月 24 日
Johan Fredrik Raak	「Data-driven Analysis of Wind Power and Power System Dynamics via Koopman Mode Decomposition」 (クープマンモード分解による風力ならびに電力システムダイナミクスのデータ駆動型解析)	平成 29 年 9 月 25 日
下西 慶	「Modeling and Estimation of Selection Interests through Gaze Behavior」 (注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定)	平成 29 年 9 月 25 日
Ilmiawan Shubhi	「Performance Enhancement of MIMO Transmission Techniques with Limited Number of Receive Antennas」 (受信アンテナ数制約下での MIMO 伝送技術の特性改善)	平成 29 年 9 月 25 日
藤原 純	「ガススマートメーター用低消費電力通信プロトコルに関する研究」	平成 29 年 9 月 25 日
芝原 光樹	「Advanced Signal Processing for Fiber-Optic Communication Systems Scaling Capacity Beyond 100 Tb/s」 (光ファイバ通信システムの 100Tb/s 容量限界の克服へ向けた信号処理技術)	平成 29 年 9 月 25 日

縄 田 信 哉 (引原隆士教授)

「Design of Electrical Energy Network Based on Power Packetization」

(電力のパケット化による電気エネルギーネットワークの設計)

平成 29 年 3 月 23 日授与

本研究は、物理層からボトムアップに研究開発が進められてきた電力のパケット化技術に基づき、電気エネルギーネットワークの設計を目指したものである (図 1)。特に、電力パケットを電力パルスと情報タグにより構成される電力の単位として定義し、量子化・デジタル化された電力の伝送の枠組みを与え、従来のアナログ回路に基づく電力伝送に対して、異なる技術の可能性を数理的に保証している。得られた主な結果は以下の通り要約される。

1. 物理層におけるルータの動作を検討した。まず、同期が確立していない場合の情報タグの読み込みを解析し、読み込み誤りの電力パケットの密度への影響を明確にした。次に、電力パケットの密度変動による電力の割り当ての可能性を、平均化により解析し、数値的に検証した。
2. 情報理論を参考に、記号を電力の最小単位として与え、電力のパケット化を、メッセージとエネルギーの記号系列による同時表現の問題として与えた。エネルギーの記号系列による表現は、有限時間においてエネルギーの総量を保証する問題で、記号系列のコストの最小化が重要となる情報理論にはない問題である (図 2)。特に、エネルギーを表現する記号系列の集合を考え、表現するエネルギーが十分大きいとき、ほとんど全ての記号系列で、記号の割合が記号のエネルギーの指数関数として定まる確率で近似できることを証明し、エネルギー表現の漸近的性質を与えた。
3. ネットワークにおける時間的・空間的な記号の伝送を記述する枠組みとして Symbol Propagation Matrix (SPM) を導入した。SPM は、量子化・デジタル化された電力の伝送をネットワークフローとして与える。電源と負荷での供給エネルギー、ルータにおける蓄積エネルギーの変化、及びリンク上のフローに重み付けを行い、最も伝送可能性の高いネットワークフローを与える問題を、離散凸解析における M 凸劣モジュラ流問題として定式化した。加えて、電力を電源に割り当てる Up-stream 問題と負荷に配分する Down-stream 問題を、隣接ノードとの情報の交換により記号レベルで処理するネットワークを設計し、その離散的なダイナミクスを数値的に検証した。
4. エネルギー保存則に基づき、電力パケットによるエネルギー伝送の連続ダイナミクスの検討を行い、回路のインピーダンスとエネルギーの分配の関係を検討した。

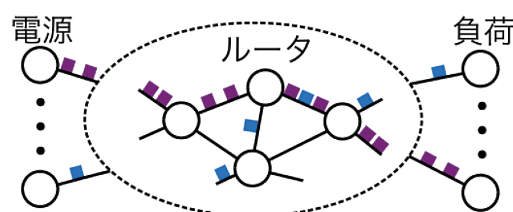


図1 電力のパケット化技術に基づく電気エネルギーネットワークの概念図。

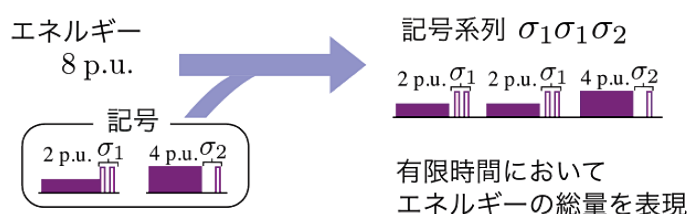


図2 エネルギーの記号系列による表現。記号を電力の最小単位として与えている。

星 野 光 (引原隆士教授)

「Analysis and Control of Multiscale Dynamics in Regional Electricity and Heat Supply Systems」

(地域電熱供給システムにおける複合スケールダイナミクスの解析と制御)

平成 29 年 3 月 23 日授与

本研究は、地域規模において電気と熱を同時に供給するエネルギーシステムの解析および制御の際に問題となる複合スケールダイナミクスの扱いについての検討結果をまとめたものである。本研究の背景には、エネルギーシステムの統合化 (Energy Systems Integration; ESI) の課題がある。ESI は電気や熱、ガスなど多様な形態のエネルギーを一括して扱うことにより、安定的かつ高効率なエネルギー供給の達成を目指すものである。従来、電気を供給する電力システムは、そこで生じる物理現象を時間スケールにより分類することで扱われてきた (図 1)。例えば、大規模発電所における蒸気ボイラの圧力ダイナミクスなどの熱力学的な現象は、十分遅いものとして扱われ、電力システムの安定性解析や周波数制御の際には検討しないことが前提とされた。しかしながら、分散型電源、特に、コージェネレーション (熱電併給, Combined Heat and Power; CHP) ユニットの普及に伴い、電力システムにおける電気磁気的・電気機械的な現象と熱力学的な現象の相互作用は無視できなくなってくる。特に、近年、地域熱供給事業用に導入された CHP を用いてアンシラリーサービスを提供することが提案されており、この場合には秒から数十秒オーダーで電気供給と熱供給の相互作用が顕在化する。

本研究では、上記背景に基づき、地域電熱供給における複合スケールダイナミクスを検討するモデルとして、図 2 に示すシステムを導入し、解析と制御に関する基礎的検討を行った。同システムは、2つの CHP を有し、電気および熱の融通が可能な構成となっている。電力システムにおける二機無限大母線系統の自然な拡張であるとともに、CHP の協調運用が可能な最小構成である同システムの検討を中心として、以下に示す主結果を得た。

(1) 従来の電力システムにおける安定性解析手法の有効性と限界を再考するため、電気と熱の間のスケール分離を仮定し、熱供給の影響をパラメータとして含む解析モデルを導出した。上記仮定の下で熱供給が電気供給に与える影響を評価可能であることを示した。一方、仮定が成立しない場合には過渡的な不安定性が発生することを示し、詳細な解析には熱サブシステムの動特性モデルが必要であることを指摘した。

(2) 電気供給との相互作用を簡易に記述することを目的として、複数のボイラと蒸気配管を含む熱供給ネットワークの動特性を解析した。低マッハ数における物理的な近似および幾何学的特異摂動論の双方の観点から検討を行い、ボイラ圧力の遅い動特性を表す集中定数モデルと蒸気流速の速い動特性を表す分布定数モデルが組み合わさった従来モデルの複合スケール性を保持した上で、簡易な集中定数モデルを導出した。

(3) 上述の解析およびモデルに基づき、電気および熱の需給バランスを確保する制御系を設計した。電気および熱サブシステムの両方に影響する CHP への燃料供給量を操作量とし、電気に関しては連系点電力、熱に関してはボイラの平均圧力を制御量とすることで、システムの入出力関係に基づく制御手法を適用し、安定化制御を達成した。また、同様の方法で電気および熱のフローの出力追従制御を達成し、安定化と出力追従が選択可能となる制御構成を検討した。

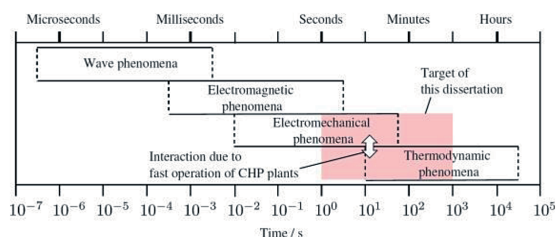


図 1：電力システムのスケール分離と本研究の検討対象

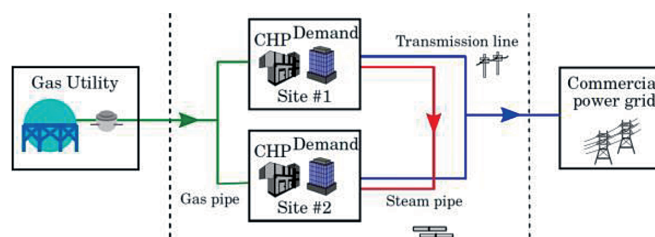


図 2：地域電熱供給の最小構成 (2 サイトシステム)

伊藤 俊 平 (松尾哲司教授)

「電磁鋼板の磁化機構に関するマルチフィジックスモデルの開発」

平成 29 年 3 月 23 日授与

電磁鋼板などの鉄心材料は多数の結晶から構成され、結晶内部に磁区構造と呼ばれる構造を持つ。その磁気特性は磁壁移動や磁化回転といった磁化過程に伴う磁区構造の変化に由来している。これらの磁化過程は、機械的な応力や、不純物、結晶欠陥、結晶粒界などのピンニングサイトの影響を受けており、材料加工時に加わる応力による磁気特性の劣化が電気機器開発の上で問題となっている。これまで、電磁鋼板の特性をエネルギー極小に基づいて再現するモデルとして、2つの磁区を持つ単純化磁区構造モデルおよび、単純化磁区構造モデル単位セルとしてそれを複数集合させた集合磁区モデルが提案されていた。しかし、従来の集合磁区モデルでは応力やピンニングサイトの影響を十分に評価できず、また磁壁移動に関連した一部の現象を表現することができなかった。

そこで、本論文は、応力やピンニングサイトの影響を考慮し、磁壁移動などの磁化過程に基づいて電磁鋼板の特性を再現するマルチフィジックスモデルの開発を行ったものである。本論文において得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 応力の影響を考慮するために、集合磁区モデルに新たに磁気弾性エネルギーを導入した。さらに、従来の集合磁区モデルにおける 90° 磁壁移動を十分に表現できないといった問題を解決するために、図1のような6つの磁区を持つ単純化磁区構造モデル・集合磁区モデルを提案した。これにより、 $90^\circ \cdot 180^\circ$ 磁壁移動を適切に表現することが可能となり、方向性電磁鋼板の圧延・直角方向の特性や、無方向性電磁鋼板の応力による透磁率の変化(図2)などの現象を再現することが可能となった。
2. 結晶磁化容易軸の分布の影響などによる電磁鋼板内部の応力の分布を考慮して磁気弾性エネルギーを計算する集合磁区モデルを提案した。これにより、方向性・無方向性電磁鋼板の磁化曲線をより測定結果に近い形で再現することが可能となった。
3. 集合磁区モデルにおいて電磁鋼板内部のピンニングサイトの分布を考慮する方法として、ピンニングの影響を密度関数に基づいたベクトルピンニング磁界によって表現する分布ピンニングモデル(M)とピンニングの影響を磁壁移動に対応した形で与えた分布ピンニングモデル(W)を提案した。これらの方法により、初磁化曲線や、振幅ごとのヒステリシス曲線のループの幅の違いを再現することが可能となった他、分布ピンニングモデル(W)は無方向性電磁鋼板の応力下の鉄損を精度よく表現することができた。

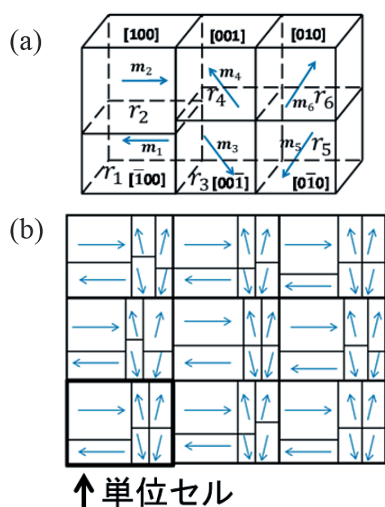


図1 (a) 単純化磁区構造モデル
(b) 集合磁区モデル

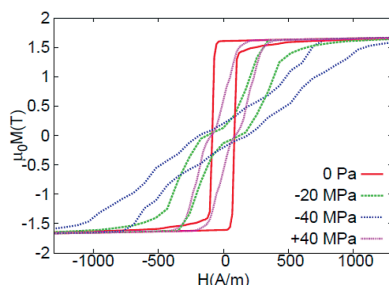


図2 集合磁区モデルによって得られた無方向性電磁鋼板の応力下の磁化曲線

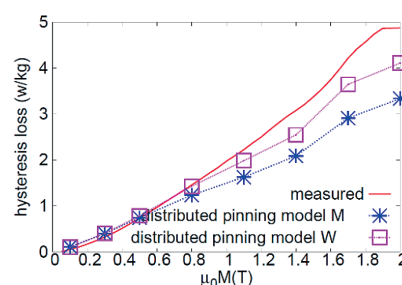


図3 集合磁区モデルによって得られた40MPaの圧縮応力下の鉄損

田 中 一 (木本恒暢教授)

「Theoretical Study on Carrier Transport in Semiconductor Nanowires Based on Atomistic Modeling」

(原子論的モデルに基づく半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理論的研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

Si 集積回路の性能向上はこれまで素子の微細化により達成されてきた。しかし極限的な微細化はゲート電極によるチャネル電位の制御性を低下させ、短チャネル効果による性能劣化につながる。これを回避するには、チャネルを立体構造としてゲートで囲い込み、電位制御性を高めることが有効であり、幅が数 nm の半導体ナノワイヤ (NW) をチャネルとし、その周囲をゲート電極で囲んだ構造を持つ NW MOSFET (図 1) が、次世代のデバイス構造として期待されている。他方で、既存の Si より高いキャリア移動度を持つチャネル材料の採用も検討されており、中でも Ge は電子・正孔の両方について高い移動度を持つことから有望視されている。以上のことから、Si のみならず Ge 等の新規材料も含んだ半導体 NW におけるキャリア輸送現象の理解が、NW MOSFET の特性を予測し、また設計指針を与えるために重要となる。しかし、NW におけるキャリア輸送、特に Ge NW の正孔輸送特性については、量子力学的閉じ込め効果による電子状態の複雑さゆえに十分理解されていない。

本論文では、半導体ナノワイヤにおけるキャリア輸送の理解、および高性能デバイスの設計指針の提示に向けて、正孔に対する量子閉じ込めの記述に適した原子論的手法に基づき、NW におけるキャリア輸送のモデルを提示し、Ge NW および Si NW における正孔輸送を解析した。本論文で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) Ge NW におけるフォノン制限正孔移動度を原子論的な波動関数とフォノンモードに基づいて計算し、高い移動度を示す NW 形状を提示した。移動度の形状依存性がバンド構造から求めた平均的な有効質量と状態密度で記述できることを示した。
- (2) 原子論的な電子状態の扱いに適した形でラフネス散乱の定式化を行い、(1) と同様の計算にラフネス散乱の効果を加えて移動度の計算を行った。量子閉じ込め効果の異方性に由来して、フォノン制限移動度が高い形状はラフネス散乱の影響も受けにくいということを示した。
- (3) 上述の散乱過程を考慮して、非線形なボルツマン輸送方程式を解くことで、様々な方位を持つ Ge NW および Si NW における高電界下での正孔輸送を解析した。Ge NW においては電界の増加に伴いドリフト速度が減少する負性微分移動度特性が顕著にみられ (図 2)、その結果として、低電界移動度は Ge の方が高いにも関わらず、高電界では Si の方が高いドリフト速度を示しうることを見出した。この結果に対しバンド構造とエネルギー緩和過程に由来する分布関数の違い (図 3) に基づき物理的説明を与えた。
- (4) トンネル効果等の量子効果を記述する量子補正ポテンシャルの新たなモデルを提案し、これを用いて Ge NW p-MOSFET および Si NW p-MOSFET における準バリスティック正孔輸送特性を計算し、その性能を予測した。NW MOSFET におけるバンド構造・キャリア散乱・ポテンシャル形状がどのように電流輸送能力を決定するかを明らかにし、キャリア輸送物理の理解に基づいてデバイス設計指針を提示した。

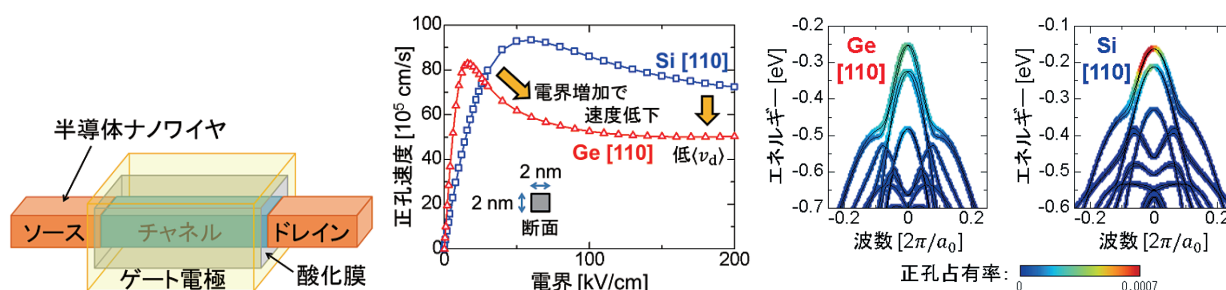


図 1: ナノワイヤ MOSFET の模式図 図 2: 正孔ドリフト速度の電界強度依存性 図 3: 高電界印加時のナノワイヤにおける正孔分布

市川 修平 (川上養一教授)

「Fundamental Study on Carrier Recombination Processes in AlGaIn-related Materials and their Structural Designs toward Highly Efficient Deep-UV Emitters」

(深紫外発光素子の高効率化にむけた AlGaIn 系半導体の結晶成長とキャリア再結合過程に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

波長 200~300 nm の深紫外光は、皮膚病治療や液晶ディスプレイの液晶分子の光配向など、様々な分野への応用が期待されている。とくに波長 260 nm 付近の深紫外光は、DNA との相互作用が強い事が知られており、殺菌・浄水用光源として注目を集めている。現在、深紫外光源として水銀ランプ（波長 253.7 nm）や ArF エキシマレーザ（波長 193 nm）等が用いられているが、ガスの人体・環境への負荷が大きい点やガス光源特有の効率の低さ・素子寿命の短さなどが大きな課題となり、深紫外光源の応用・普及を妨げている現状にある。これらに代わる新たな深紫外光源を、AlGaIn 系半導体を利用したデバイスにより実現することで、環境への負荷を抑え、かつ高効率・長素子寿命の発光素子が可能となる。しかしながら AlGaIn 系半導体の発光素子は開発途上の段階にあり、LED の外部量子効率はまだ 10% 程度以下、波長 300 nm 以下の LD も実現されていない等の現状にある。本研究では、AlGaIn 系半導体の結晶成長や構造評価、光物性評価などを通して高効率深紫外発光素子の実現に向けた基礎研究を行った。

本研究では、結晶成長条件の最適化により高品質半極性 AlGaIn/AlN 量子井戸を実現した。作製した量子井戸内における内部電界の大きさを見積もり、光学的特性に与える影響について議論することで、半極性面量子井戸の光学的な優位性を実証した。また、光学評価やキャリアダイナミクスに関する計算モデルの拡張を通して、AlGaIn 系半導体における支配的な非輻射再結合中心の同定や、それらがキャリアに与える影響について考察し、非輻射再結合中心の低減にむけた量子井戸構造の設計指針を示した。主要な内容を以下に示す。

1. 有機金属気相成長法を用いて、半極性面 AlN 基板上に AlGaIn/AlN 構造の成長を行った。従来の極性面基板上と同様の条件で半極性面基板上にホモエピタキシャル成長を行った際には、著しい結晶性の悪化が観察されたが（図 1 左図）、炉内圧力を上げて成長を行うことで生成される表面ピット内部に成長核生成を促進し、ピットを消滅させ、原子レベルで平坦な表面（図 1 右図）を実現できることを見出した。
2. 半極性面 AlGaIn/AlN 量子井戸では、活性層にかかる内部電界が極性面量子井戸の 1/3 以下に低減され、輻射再結合寿命が短寿命化することで、従来比 75 倍以上の強発光を実現できることを明らかにした。
3. カソードルミネッセンス測定を利用することで、AlGaIn 系半導体の主要な非輻射再結合経路が点欠陥を介したものであることを示した。成長条件により Al 空孔を低減することで、さらなる効率改善の可能性を示した。
4. 量子井戸作製時にかかる格子歪みを考慮して、六方晶系用に臨界膜厚モデルを拡張し、量子井戸構造作製時における設計指針を示した。
5. 半極性面 AlGaIn/AlN 量子井戸の面内偏光特性を制御することで、劈開面からの強い光取り出しを可能にし、初めて半極性面 AlGaIn/AlN 量子井戸からの誘導放出を実現した（図 2）。

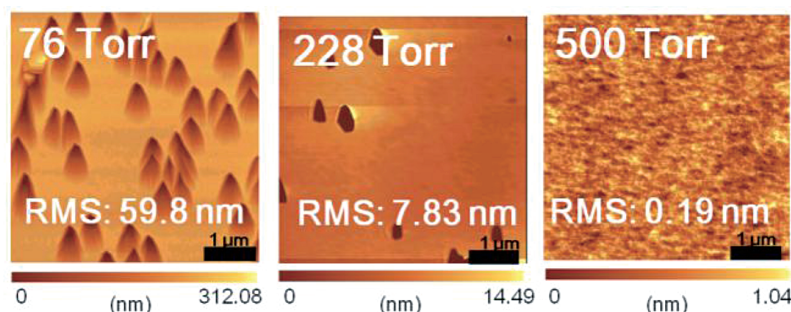


図 1: 半極性面 (*r* 面) AlN 薄膜の表面モフォロジーの成長圧力依存性

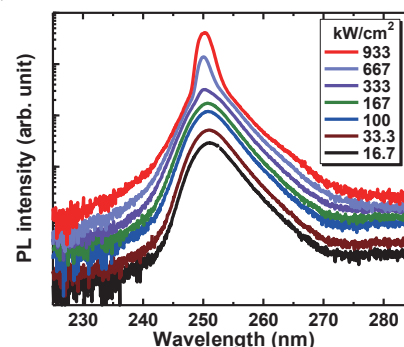


図 2: 半極性面 (*r* 面) AlGaIn/AlN 量子井戸からの自然放出・誘導放出スペクトル

尾崎 拓也 (川上養一教授)

「Growth of InGaN-Based Emitters on ScAlMgO₄ Substrates for Full Visible Spectral Range」

(可視全域をカバーする発光素子開発のための ScAlMgO₄ 基板上への InGaN 系発光層の成長に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

窒化ガリウムインジウム (InGaN) は、青色や緑色の発光ダイオード (LED) やレーザダイオードの発光層として用いられている。特に、青色 LED と蛍光体を組み合わせた白色 LED は、照明機器やディスプレイのバックライトなど幅広く応用されている。しかし、原理的には、InGaN 混晶を構成する GaN の禁制帯幅 (3.4 eV) から InN のそれ (0.64 eV) に相当する波長域 (365 nm – 2 μm) をカバーできるはずであることを考えると、材料のポテンシャルの一部しか利用できていない状況にあるといつてよい。特に、緑色から赤色の可視長波長領域の発光効率、青色領域のそれに比べると半分以下と低い。青・緑・赤を含むの可視領域全域で InGaN を用いた高効率な発光デバイスが実現できれば、ディスプレイ応用上のインパクトは大きい。本論文では、可視長波長領域の発光効率を向上させるため、発光層の歪やミスフィット転位の発生を抑制できる新奇基板材料として、(0001) 面で In_{0.17}Ga_{0.83}N との格子整合が期待できる ScAlMgO₄ 基板を提案し、この基板上への結晶成長技術およびデバイス作製技術の確立を行った。

特筆すべき成果として、従来 LED に用いられている sapphire 基板上の LED と比べて、高輝度の青色 LED を GaN/ScAlMgO₄ 基板上に試作することに成功した(図 1)。この結果は、投稿した論文誌 (*Appl. Phys. Exp.* 8, 062101) において Spotlight 論文に選ばれ、また応用物理学会での口頭発表は全講演の 0.6% に当たる注目発表に選出された。さらに、格子整合した In_{0.17}Ga_{0.83}N/ ScAlMgO₄ 上に赤色発光する In_xGa_{1-x}N/ In_yGa_{1-y}N 多重量子井戸 (QW) 構造を作製したところ、従来の sapphire 基板上の構造と比較して高い内部量子効率を持つことがわかった (図 2)。可視長波長領域における窒化物半導体発光素子の結晶成長用基板として、ScAlMgO₄ が高い優位性を持っていることを示した結果であると考えている。

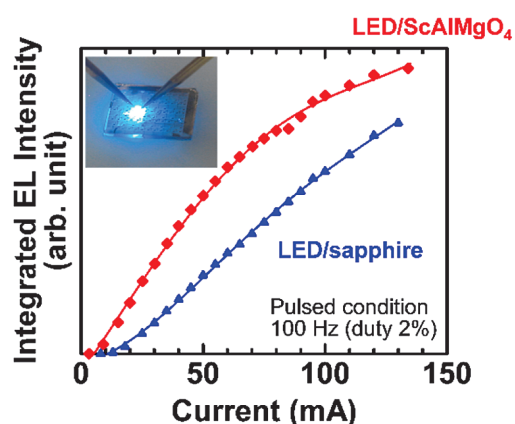


図 1: GaN/ScAlMgO₄ および GaN/sapphire テンプレート上の青色 LED の EL 発光強度の注入電流依存性 (パルス駆動条件)。挿入図: GaN/ScAlMgO₄ 上 青色 LED の DC20 mA 時の EL の様子。

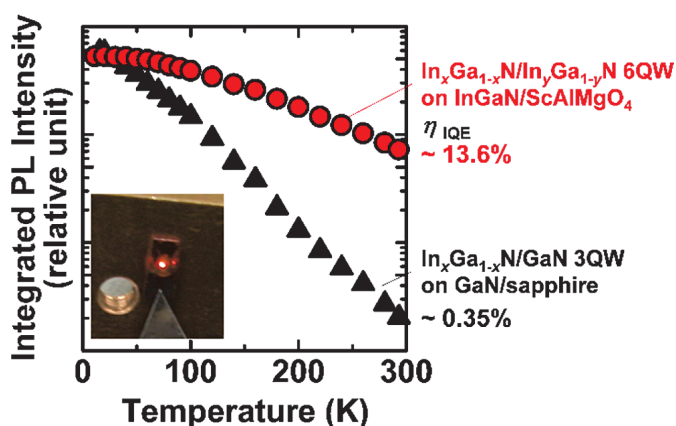


図 2: ScAlMgO₄ 基板および sapphire 基板上の赤色発光 InGaN QW 構造の光励起発光の温度依存性。挿入図: ScAlMgO₄ 基板上赤色 InGaN QW の PL の様子。

山口 皓 平 (山川宏教授)

[On Asteroid Deflection Techniques Exploiting Space Plasma Environment]

(宇宙プラズマ環境を利用した小惑星の軌道変更手法に関する研究)

平成 29 年 3 月 23 日授与

小惑星の地球衝突は、頻度こそ低いものの、ひとたび発生すれば我々の生活に大きな被害をもたらし得る災害の一つである。人類の宇宙探査技術は目覚ましい発展を遂げているが、小惑星の地球衝突問題に対処するためには、未だに多くの課題が残る。本研究は、地球に衝突する恐れのある小惑星の軌道変更、ひいては地球衝突を回避するため、宇宙プラズマ環境を積極的に利用した効果的な手法を提案・検討するものである。

まず、加速した宇宙機を高速で小惑星に衝突させる軌道変更手法である Kinetic Impactor (KI) を評価するための概念を提案した。KI に用いる宇宙機軌道は、衝突によって達成される小惑星の軌道変更距離を評価関数とした最適化問題を解くことで求められる。本研究では、宇宙機衝突の効率をより詳細に解析するため、衝突によって達成される小惑星の軌道エネルギー変化の最大値を宇宙機軌道の半長径と離心率の関数として可視化する Impact Geometry Map (IGM) を提案した (図 1)。IGM を用いることで、設計した KI ミッションによって得られる小惑星の軌道エネルギーの変化が、理想的な場合と比較してどの程度の効率であるかを、用いる推進システムの種類に依らず評価することが可能となる。KI については、帯電セイルと呼ばれる推進システムで宇宙機を加速する手法についても検討した。帯電セイルは、高電位に帯電した導電性テザーを宇宙機の本体から展開し、太陽から吹き付ける高速のプラズマ流である太陽風中の陽子と干渉させることで推進力を発生させる燃料レス・推進システムである。本研究では、これまで明らかにされてこなかった、帯電セイルの太陽風に対する姿勢と発生する推力の関係を定式化した。また、大規模システムであることから姿勢変更技術が未確立であった帯電セイルを、テザー電位の電気的な変更のみで軌道制御する手法を提案した。小惑星への衝突軌道を最適化した結果、提案した軌道制御手法で衝突軌道が設計可能であり、従来の燃料噴射型の推進システムを利用した場合と比較して大きな軌道変更距離が達成可能であることを示した。

一つ目の手法として検討したのは、小惑星と宇宙機の双方を人工的に帯電させ、両者の間に働くクーロン力と万有引力によって小惑星を牽引し軌道変更する、クーロン力・アトラクタである。これは、万有引力のみで小惑星を牽引する重力トラクタを発展させたものであり、用いる宇宙機の質量低減、クーロン力の導入による牽引力の増大といったメリットがある。本研究ではまず、帯電した小惑星と宇宙プラズマとの相互作用を解析する数値計算コードを開発し、小惑星の人工的な帯電の可能性を検証した。本コードは、実際の小惑星形状を反映した三次元メッシュデータをもとに、表面を構成する各要素の電流収支を計算するものである。電流源として、宇宙プラズマ中の電子と陽子、それらの衝突によって発生する二次電子、更に、太陽光照射によって生じる光電子が考慮され、表面電圧の非線形関数として表現される各電流の和が零となる電位を計算することで、小惑星の帯電状態を求める (図 2)。開発したコードにより、プラズマコンタクトを小惑星に設置し、荷電粒子を排出することで、炭素で構成される C 型小惑星を人工的に帯電させることが可能であることを示した。また、クーロン力を考慮した宇宙機の運動方程式の導出と制御則について検討し、帯電宇宙機の軌道制御について定式化した。更に、クーロン力・アトラクタによる小惑星の軌道変更距離を計算し、低質量かつ離心率の小さな軌道にある小惑星の軌道変更特に効果的であることを明らかにした。このような小惑星は、重力トラクタによる軌道変更が困難であり、クーロン力・アトラクタの優位性を示した。

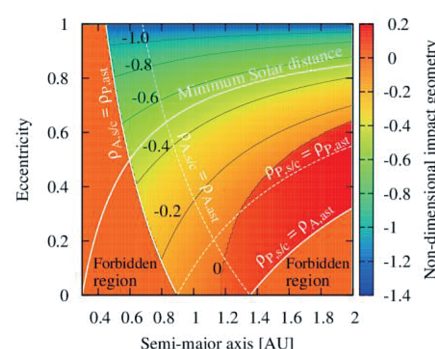


図 1 Impact Geometry Map.

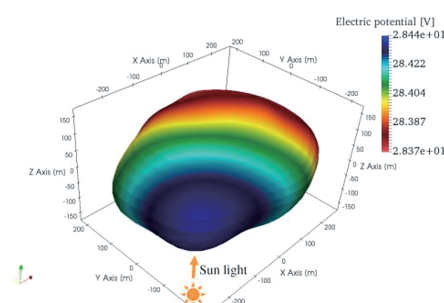


図 2 小惑星の自然帯電解析例.

浦 出 芳 郎 (北野正雄教授)

「Electromagnetic Properties of Checkerboard-like Metallic Structures at Terahertz Frequencies」

(チェッカーボード状金属構造のテラヘルツ帯における電磁的性質)

平成 29 年 3 月 23 日授与

近年、電磁波をより高い自由度で制御する手段として、電磁メタマテリアルやメタ表面（二次元的なメタマテリアル）と呼ばれる人工構造体が大きな注目を集めている。電磁メタマテリアルとは注目する波長に比べて小さい単位構造からなる人工的な「物質」であり、その構造を適切に設計することで通常の物質だけでは実現困難な電磁応答を実現することができる。こういった構造や配置に関する自由度は無数にあるため、種々の構造でどのような電磁応答が発現するのかを見極めるために、その対称性に着目することが重要である。本論文は、自己補対性と呼ばれる対称性をもつチェッカーボード状金属構造が示す特異な電磁的性質について、特にテラヘルツ帯という周波数帯に着目し、実験・数値シミュレーション・理論の三つの手法により論じたものである。本論文の成果は大きく以下の2つの観点から整理される：

1. 自己補対性に起因する周波数無依存応答

理想的なチェッカーボード状金属構造は金属部と空隙部の入れ替えに関する対称性である自己補対性を有しており、それに起因した周波数無依存な応答が予想される。本論文では、自己補対性に必要であると考えられていた実現不可能な点接触の部分を抵抗膜で置換するという独自の発想に基づき、実際に試料を作製し[図 1(a)]、テラヘルツ帯でその特性を評価した。理論的に予想される特定の抵抗値において自己補対性に起因する周波数無依存な透過特性が生じることを観測した[図 1(b)]。また、こうした抵抗膜を装荷した自己補対チェッカーボード状金属構造の両側から同位相・等強度のテラヘルツ波を入射すると、回折周波数以下で、広帯域かつ入射エネルギーをサブ波長領域に集める作用をもったコヒーレント完全吸収体として振る舞うことを明らかにした。

2. 金属部の接続性に依存した特異な電磁応答の動的メタ表面への応用

チェッカーボード状金属構造は金属部の接点が電氣的に接続しているか、していないかによってその電磁応答が大きく変化する。本論文では、その特異な性質に着目して、抵抗値を動的にスイッチングできる物質を接点部に配置した動的に特性可変なメタ表面を提案した。実際に、二酸化バナジウムとチェッカーボード状構造を組み合わせ、テラヘルツ波応答の動的切り替えの原理実証に成功した。また、単純なチェッカーボード状構造の透過特性の切り替えに加えて、チェッカーボード状構造に平面カイラリティをもった構造を適切に埋め込むことで、構造がもつ平面カイラリティの切り替えが可能になることを理論的・数値的に示した。

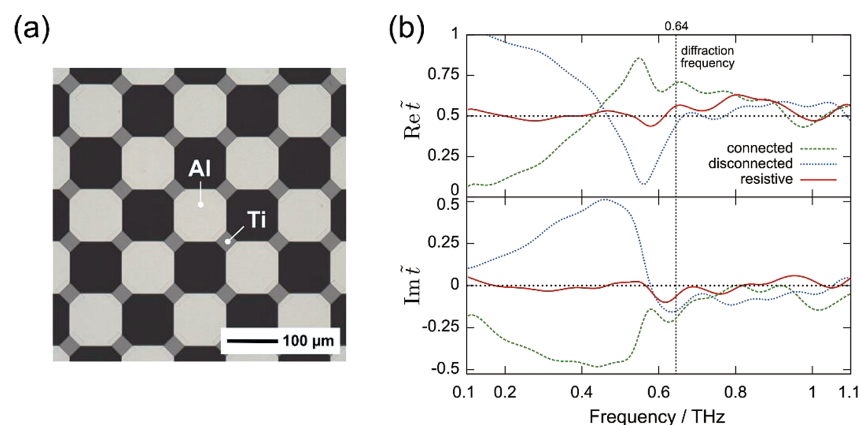


図 1：(a) 作製した抵抗膜置換型チェッカーボード金属構造の光学顕微鏡像。(b) その複素透過係数の実部・虚部それぞれのスペクトル(赤の実線)。Y. Urade *et al.*, Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015) より転載。

大 谷 芳 明 (水内亨教授)

「ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響に関する研究」
平成 29 年 3 月 23 日授与

本論文は、ヘリカル型装置であるヘリオトロン J 及び大型ヘリカル装置 (LHD) においてプラズマ粒子輸送に対するイオン種の違いが与える影響 (イオン種効果) を評価し、まとめたものである。これは、粒子輸送に対するイオン種効果の物理機構解明に向けた基礎実験であるばかりではなく、将来のヘリカル型核融合炉設計において必要な DT 混合プラズマの閉じ込め性能の予測性向上に向けた重要な知見である。

プラズマ粒子輸送を評価するための有力な手法として、密度変調法がある。これは、プラズマ周辺部の粒子供給量に変調をかけ、プラズマ周辺部から中心方向へ伝搬する密度の変調を評価することにより、プラズマの拡散係数及び対流速度を評価する手法である。当初、ヘリオトロン J ではプラズマ中心を通過する一視線のマイクロ波干渉計しかなかったため、周辺部の密度を計測するために、遠赤外線レーザを光源とするヘテロダイン検波のマイケルソン干渉計を新たに構築した。本干渉計では、レーザビームがプラズマ密度による屈折効果の大きい領域を通過するため、屈折の影響の小さい短波長の HCN レーザ ($\lambda = 337 \mu\text{m}$) を用いている。これにより、実験的に $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上の線平均電子密度を持つプラズマの計測に成功した。

ヘリオトロン J において電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) の D 及び H プラズマに対して 50、100、125 Hz の変調周波数で密度変調実験を行った。新 HCN レーザ干渉計と既存干渉計を用いて電子密度の時間発展を計測し、粒子拡散係数 (D_{mod}) と対流速度 (V_{mod}) を評価したところ、図 1 に示すように D プラズマの D_{mod} 及びプラズマ中心方向への V_{mod} は共に H プラズマよりも小さく、イオン種効果 (水素同位体効果) があることが示された。

LHD においては、ECH の H 及びヘリウム (He) プラズマに対して密度変調実験を行い、 D_{mod} と V_{mod} を評価した。電子内部輸送障壁が形成されていない周辺 L-mode 領域において、図 2 に示すように D_{mod} に対する H-He イオン種効果に明確な衝突周波数依存性が見られた。高衝突周波数領域では、He プラズマの D_{mod} が H プラズマよりも大きくなる傾向が示された。一方、 V_{mod} には明確なイオン種効果は現れなかった。

D_{mod} 及び V_{mod} に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を議論するために、本研究で明らかにしたヘリオトロン J、LHD の D_{mod} 及び V_{mod} に加え、先行研究で評価された中型ヘリカル型装置 CHS の D_{mod} 及び V_{mod} を比較した。LHD 及び CHS における D_{mod} は衝突周波数の減少に伴い増大する傾向は一致した。LHD では、 D_{mod} に対する H-He イオン種効果による差異は、衝突周波数の減少により少なくなる。一方、CHS では、 D_{mod} に対する水素同位体効果による差異は、衝突周波数の減少に伴い増大し、ヘリオトロン J における低衝突周波数領域で水素同位体効果が現れる特徴と一致している。すなわち、LHD での結果と、CHS ならびにヘリオトロン J での結果は、逆の特徴がある。一方、 V_{mod} に対しては、LHD では H-He イオン種効果、CHS では水素同位体効果が見られなかったが、ヘリオトロン J ではわずかに水素同位体効果が見られた。これらのことから、装置の運転領域や磁場配位により、粒子種の違いが粒子輸送に与える影響が異なることを示した。

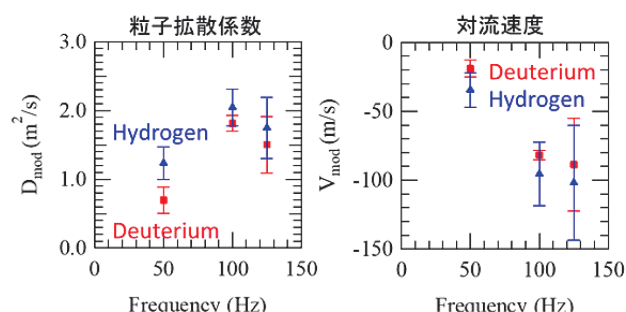


図 1. ヘリオトロン J における粒子拡散係数と対流速度 (径方向を正)

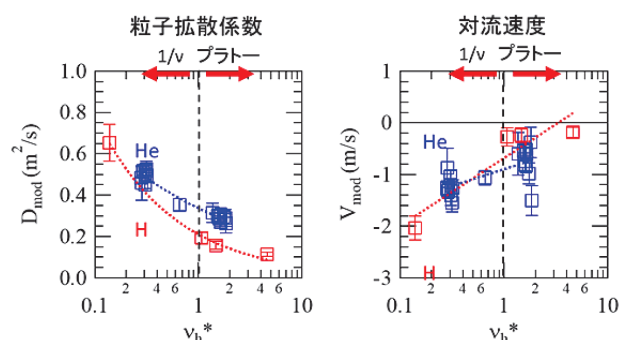


図 2. LHD の L-mode 領域における粒子拡散係数と対流速度 (径方向を正) の衝突周波数依存性

松 室 堯 之 (篠原真毅教授)

「Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission」

(先進的マイクロ波電力伝送に向けた球面波合成による高度ビーム形成)

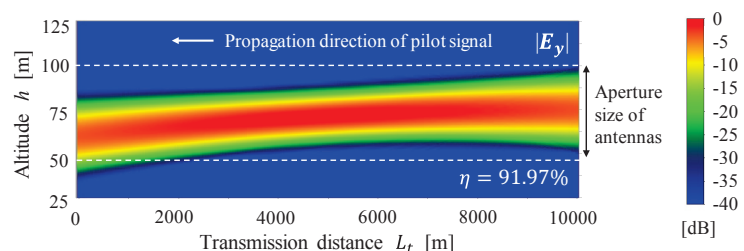
平成 29 年 3 月 23 日授与

本論文は、人体への影響や他の無線システムとの干渉を考慮した先進的マイクロ波電力伝送システムの実現を目的として、異なる次数の球面波を重ね合わせることで所望のビームを合成する手法に関する研究成果についてまとめたものである。宇宙太陽発電システムのような大規模なマイクロ波電力伝送の実現には、地上におけるマイクロ波電力伝送の早期社会実装が重要であるが、地上においては人体への影響や他の無線システムへの干渉が特に問題となる。そこで本研究では、このような問題に対しマクスウェル方程式の基底関数である球面波の集合によって設計された理想的な電磁界を用いて、(1) ユビキタス型マイクロ波電力伝送における受電アンテナの小型化と (2) ビーム型マイクロ波電力伝送におけるエネルギー低漏洩化について検討した。

開口面アンテナの理論によれば、一定の電力密度における受電電力はアンテナの開口面積に比例する。これに対して本研究では、原点の多重極から放射する球ハネル放射波を適切に合成することにより高い指向性が得られることを示した。この合成球面波が持つ指向性を角運動量と角度の不確定性関係から導出するとともに、原点近傍に存在する次数に応じた大きさの遮断領域が本質的な波源となり有効開口面積を形成することを示した。また、有限の大きさを持つ球形誘電体共振器が正確な高次モード球面波の波源として動作することを明らかにし、多層構造を持つ球形誘電体共振器により次数の異なる共振モードが縮退可能であることを示した。これらの結果から、最大の球面波が持つ遮断領域よりも小さな誘電体共振器を用いることにより、物理的断面積より大きな有効開口面積を持つ放射系が実現可能であることが示された。多層球形誘電体共振器が、人体の影響を考慮したユビキタス型マイクロ波電力伝送における小型受電アンテナの基本構造を与えることを述べた。

従来のビーム型マイクロ波電力伝送においては、アレーアンテナの入力分布が第一に決定される。これに対して本研究では、アレーアンテナの設計に先立って真空中を伝搬するビーム形状を最適化する立場をとった。同じ最大次数を持つ外向き合成球面波と内向き合成球面波を同振幅で合成することにより特異点を持たないビーム電磁界を得た。このビーム電磁界の断面分布に比例した振幅分布および位相分布を送電アンテナ素子に入力（転写）することにより低漏洩ビームを形成した。さらに本研究では、このように設計した低漏洩ビームをパイロット信号に適用した単一周波数レトロディレクティブシステムを提案した。屈折率の周波数依存性の影響を避けるためパイロット信号とマイクロ波電力の伝搬には同一周波数で直交する偏波を適用した。直交する2つの偏波を独立に放射吸収するためのアレーアンテナ素子として直交2重モード誘電体共振器アンテナを新たに提案し、良好なアイソレーション特性が実験により得られた。これらの結果から、地上における水平ビーム型マイクロ波電力伝送システムにおける信頼性向上の見通しが得られた。

(a) Beam pilot signal ($\partial N/\partial h = 0.3 \text{ m}^{-1}$)



(b) Microwave power ($\partial N/\partial h = 0.3 \text{ m}^{-1}$)

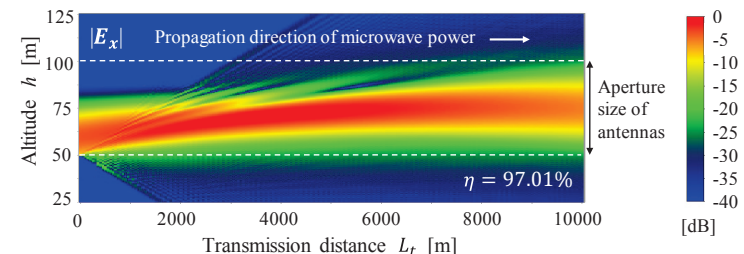


図 1：ビーム状パイロット信号とマイクロ波電力信号の計算結果

倪 俊 雄 (小山田耕二教授)

「Advanced Modeling Techniques for High Performance and Human Centered LED Lighting System」

(高効率で人に優しい LED 照明システムのための先進的モデリング技術の開発)

平成 29 年 3 月 23 日授与

近年、発光ダイオード (LED) を用いた 高性能ディスプレイの研究やユーザー指向の照明シミュレーションは、コンピュータ支援設計として多くの研究分野で注目されている。LED は、高度な照明や大規模ディスプレイだけでなく他の分野でも使われている。その中でも発光効率の高い LED のシミュレーションは、照明システムにおけるパラメータ変更による影響を理解するために重要な役割を果たす。従来の光学のモデリングとシミュレーション技術は、ある特定のソフトウェアに依存しており、これらのソフトウェアは、単一の分野による使用を前提としている。そのため、光学に関わる学際的な研究を行う多くの研究者が、他分野のモデリングやシミュレーションを行うのは難しかった。

本研究は、発光ダイオード (LED) を用いた照明システム設計における問題を解決するための新しいモデリング手法に関する研究の成果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 高出力・省電力の観点では、LED 基板を多層にすることが望ましいとされていたが、LED 基板は不透明であるため、現実には多層にすることができなかった。この課題を解決するために、LED 基板に穴をあけ、視点から見て後方の LED 基板からの光を前方へ放射するようにした。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術を利用し、LED 基板の層数に応じた出力が得られていることを確認した。
2. LED 表示システムにおいて、人間の眼に悪影響を及ぼすブルーライトを低減すると、色性能が劣化する傾向にある。この問題を解決するために、白色 LED の青色帯エネルギーを 50% 削減し、シアン LED を追加する表示システムを提案した。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術を利用し、提案したシステムがブルーライトの影響の低減と色性能の維持を同時に実現することを示した。
3. これまで、車載 LED ハイビームシステムでは、天候の状況に関わらず、固定の色温度による照明を行っており、エネルギー効率上問題があることが指摘されていた。この課題を解決するために、ハイビームランプ付近に反射シートを設置するデザインを提案した。本提案手法の有用性を検証するために光学シミュレーション技術 (図 1 参照) を利用し、好天候時に高い色温度を用い、悪天候時に低い色温度を使用することにより、エネルギー効率が改善することを示した。

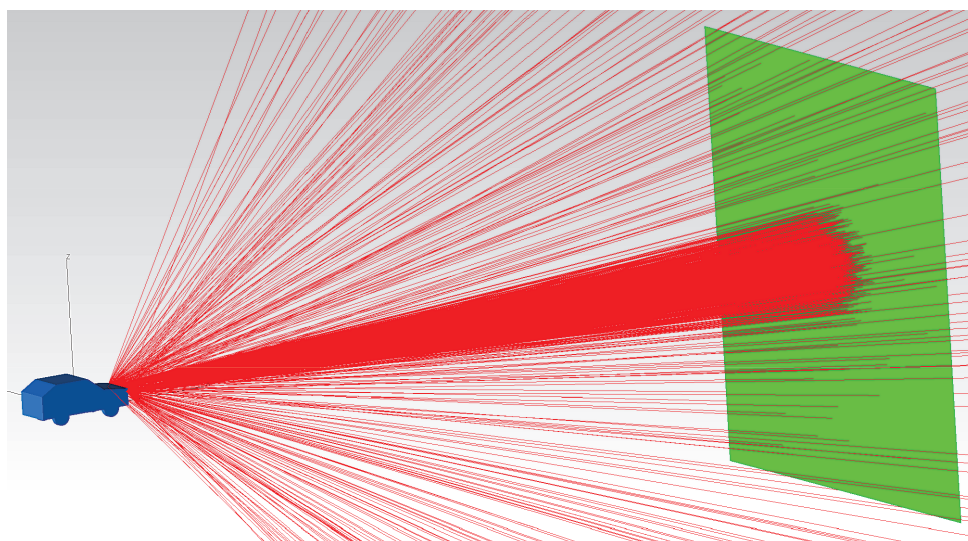


図 1 ハイビームランプ付近に反射シートを設置したモデルによる光学シミュレーション結果

片岡 研 (川上養一教授)

「深紫外多波長発光素子の実現に向けた AlGaN 量子井戸三次元微細構造制御に関する研究」

平成 29 年 5 月 23 日授与

深紫外光 (DUV) は殺菌、医療、樹脂硬化など様々な分野に利用されている。光源として水銀ランプが広く用いられているが、水銀使用の抑制等の観点から発光ダイオード (LED) 等の固体光源化が望まれている。ただし、多波長性の水銀ランプと単色性の LED では、単純な置き換えが難しい用途もある。例えば樹脂硬化では、水銀の複数の輝線は表面と内部の同時硬化に有効で、多波長深紫外発光素子の実現が望まれる。

可視光領域の多波長 LED として、誘電体マスク材料を用いた再成長技術による GaN 系三次元 (3D) 構造 LED が報告されている。一方紫外光領域において、この手法を AlN 系紫外材料に適用して UV 多波長発光を実現することは、Al 原料の高い反応性のため困難であった。本論文では、深紫外多波長発光素子の実現に向けて、AlGaN 系 3D 構造の成長手法と設計について検討を行った。本研究で得られた主な成果を以下に示す。

1. AlN $[11\bar{2}0]$ 方向のストライプ溝を形成した AlN/サファイア基板テンプレート上への再成長により、誘電体マスクを用いることなく、 $\{1\bar{1}01\}$ と (0001) 面で構成された AlN 系 3D 構造を得ることに成功した。成長条件に対する形状の制御性は GaN に比べて低く、これは Al の反応性の高さに由来した表面マイグレーション長の短さが原因であると結論づけた。
2. AlN 系 3D 構造上に AlGaN 量子井戸構造を作製した。カソードルミネッセンス (CL) 測定により空間分解分光を行ったところ、溝端部での長波長発光とその他の領域からの短波長発光の重ね合わせにより多波長発光を示すことがわかった。溝端部には、複数の原子ステップが集まった 10 nm 程度の高さの段差 (バンチトステップ) が形成されており、そこに Al よりもマイグレーション長の長い Ga が優先的に取り込まれることにより、局所的なポテンシャルの低下とそれに伴う発光の長波長化がおこることを明らかにした。またバンチトステップでは、周辺のテラス部との発光面積比に対して発光強度比が大きく、高い発光効率をもつことが示唆された。
3. 図 1 のような 3D LED の作製評価を行い、深紫外多波長発光 LED を実現した (図 2)。AlN 系 3D 構造上に形成されたバンチトステップが、AlGaN の膜厚 $\cdot V/III$ 比等の成長条件により消失することも明らかにした。
4. AlN $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ の等価な 2 方向により囲まれた、凸型または凹型の菱形を 2 次元状に配置した新たな 3D 構造を提案・作製した。本構造では、発光効率の高いバンチトステップの面積比を高めることで、平坦構造と比較して CL 積分発光強度が約 2 倍となった。また凸型の菱形構造では、凸部周囲の溝に形成されたバンチトステップからの 2 つの長波長ピークと、その他領域からの短波長ピークからなる多波長 CL スペクトルが得られ、ストライプ構造と比較してさらなる多波長化を実現した (図 3)。バンチトステップでの複数ピーク発光は、微細構造中の原料濃度分布による、ステップ部での Al 組成分布が原因と考えている。

以上の結果から、AlGaN 3D 構造による深紫外多波長発光素子の作製手法および設計指針を示した。得られた知見は、AlGaN 発光素子における多波長化のみでなく、微細構造による発光の高効率化など半導体発光素子の高性能化への展開が期待される。

発表論文) *Appl. Phys. Exp.* **10**, 031001 (2017), *Appl. Phys. Exp.* **10**, 121001 (2017).

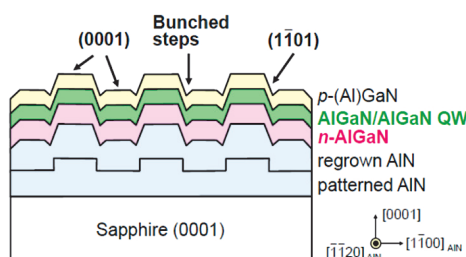


図 1 : 3D LED の断面構造の概略

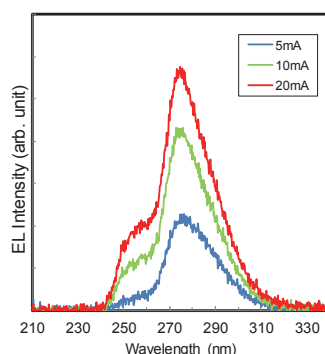


図 2 : 3D LED の電流注入発光スペクトル

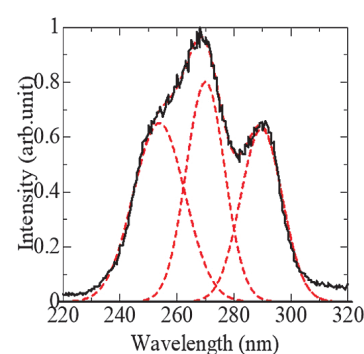


図 3: 凸型の菱形構造からの室温 CL スペクトル

野村 義 樹 (掛谷一弘准教授)

「Bi 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究」

平成 29 年 7 月 24 日授与

銅酸化物高温超伝導体は結晶構造中にジョセフソン接合を内包しており固有ジョセフソン接合と呼ばれる。固有ジョセフソン接合は構造上単一の固有ジョセフソン接合を取り出すことが困難であり、超伝導層も絶縁層も原子数層で構成されるため隣接する固有ジョセフソン接合間で相互作用が働く。このため金属超伝導体を用いたジョセフソン接合では考慮する必要がない相互作用を理解することが、固有ジョセフソン接合の電子デバイスの作製には必要不可欠である。

本研究では 3 種類の Bi 系高温超伝導体 (Bi2201, Bi2212, Bi2223) を用いて固有ジョセフソン接合間の相互作用が量子現象に与える影響について調べた。本研究では特に巨視的量子トンネル効果に注目して実験を行った。ジョセフソン接合が零電圧状態から有限電圧状態に移るとき、極低温では巨視的量子トンネル効果と呼ばれる量子揺らぎによって遷移が引き起こされ、高温では熱揺らぎによって遷移が引き起こされる。巨視的量子トンネル効果による遷移確率と熱揺らぎによる遷移確率が等しくなる温度をクロスオーバー温度と呼び、実験から求められるクロスオーバー温度が 3 種類の Bi 系高温超伝導体間でどのように変化するかを調べた。

本研究では実験的に以下の事実を示した。

(1) 3 種類の Bi 系高温超伝導体を用いて、巨視的量子トンネル効果の測定を行った。第一スイッチと呼ばれるスイッチではすべての素子で巨視的量子トンネル効果が観測された。第二スイッチと呼ばれるスイッチでは Bi2201, Bi2212 ではクロスオーバー温度が増大することを観測した。一方で Bi2223 ではクロスオーバー温度は第一スイッチと第二スイッチでほぼ等しくなった(図1)。Bi2223 の結果は第一スイッチと第二スイッチがそれぞれ独立にふるまっていることを示している。Bi2223 と Bi2212 の差は超伝導層厚さのみであるため、超伝導層厚さが増加すると、相互作用の影響は弱くなることを示した。

(2) Bi2212 において同じ結晶から作製した素子を用いて第二スイッチのクロスオーバー温度と臨界電流密度の関係について調べた。その結果臨界電流密度が増加すると、クロスオーバー温度が低下するという負の相関が得られた。臨界電流密度はキャリア濃度によって決まることから、キャリア濃度が増加すると相互作用が弱くなることを示した。

これらの実験結果から量子現象において重要な相互作用は比較的近距離の相互作用であることを示し、電荷結合と呼ばれる結合を仮定すれば今回得られた実験結果を説明できることを述べた。

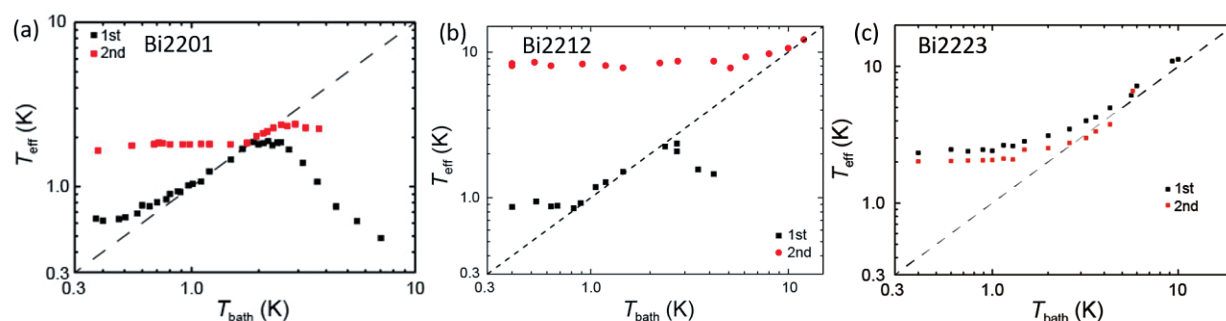


図 1: (a) - (c) それぞれ Bi2201, Bi2212, Bi2223 の実効温度 (T_{eff}) の測定温度 (T_{bath}) 依存性を示す。 T_{eff} はゆらぎの大きさを示すパラメータ。クロスオーバー温度は T_{eff} が温度依存性を示さなくなる温度を指す。

Johan Fredrik Raak (引原隆士教授)

「Data-driven analysis of wind power and power system dynamics via Koopman mode decomposition」

(クープマンモード分解による風力ならびに電力システムダイナミクスデータのデータ駆動型解析)

平成 29 年 9 月 25 日授与

This dissertation focuses on data-driven analysis of power systems and wind power systems by utilizing a recently developed mathematical framework called Koopman Mode Analysis (KMA). KMA is based on spectral analysis of the so-called Koopman operator which governs the evolution of observables of nonlinear dynamical systems. KMA is related to the so-called Dynamic Mode Decomposition (DMD)—a promising technique for the analysis of complex multivariate data which was proposed a few years ago to analyze complex fluid flows. Since then, a great deal of interest has been directed towards this technique, and many new extensions and variants of DMD have been proposed. The purpose of these techniques is essentially to extract dynamic characteristics such as oscillatory structures or modes from complex, nonlinear systems, by utilizing only measurements, without a-priori knowledge of the system. This can be viewed as a model-reduction technique, which aims at capturing the essential dynamic characteristics of a possibly unknown system, which enables analysis, prediction and control of the target system. Connections between DMD and the Koopman operator have been highlighted, and thus DMD has been called Koopman Mode Decomposition (KMD).

This dissertation demonstrates and proposes several new applications of KMD related to the analysis of wind power and power systems. A thorough review of the Koopman operator and KMD is provided, including descriptions of the most common numerical techniques, and theorems connecting different algorithms. Three KMD algorithms are evaluated with several data sets and under the influence of various levels of noise. These results clarify the applicability and suitability of the algorithms to different types of data.

The bulk of this dissertation then discusses wind power fluctuations in Japan. Wind power fluctuations are analyzed on spatial scales ranging from hundreds of kilometers to hundreds of meters, and on timescales ranging from seconds to weeks. First, a statistical evaluation of short-term wind power fluctuations is conducted which shows that significant power output fluctuations from wind turbines are to a large extent not suppressed in the wind farm output, giving rise to large output fluctuations. The results imply that care should be taken about short-term correlations in wind farms. Following that, large-scale smoothing effects of wind power are investigated by incorporating data from weather simulations. The smoothing effects are determined by the correlation between wind farm outputs at various timescales. A better understanding of the smoothing characteristics, e.g. understanding the size of the wind farm distribution area required to achieve a certain degree of smoothing in the aggregated wind power, would contribute to smarter planning and better utilization of equipment and natural energy resources, and greater reliability. To quantify the smoothing effects of wind power in Japan, a new index via KMD is proposed. The results from applying the proposed index highlight the importance of deliberately selecting sites for large-scale wind power production to more effectively smooth the aggregated power. Finally, prediction of short-term wind speed fluctuations is investigated by utilizing KMD.

Lastly, applications of KMD related to power system analysis and security are demonstrated. In particular, by applying KMD to power system dynamics, connections between so-called Koopman modes and spectral graph theory are discovered. This indicates that graph properties can be inferred from dynamics on networks via the spectrum of the Koopman operator. Also, a practical data-driven method utilizing KMD is outlined to partition a power system into disjoint parts, which is a vital component of a controlled islanding strategy aimed to save power systems from large-scale blackouts. This investigation indicates that data-driven methods such as KMD can be regarded as promising tools for effective monitoring and control of future, more variable, and power systems.

下 西 慶 (川嶋宏彰准教授)

「Modeling and Estimation of Selection Interests through Gaze Behavior」

(注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定)

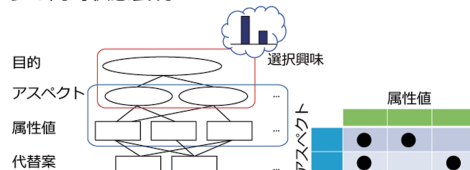
平成 29 年 9 月 25 日授与

我々は日常的に複数候補の中から対象を一つ選択するという選択行為を行っている。たとえば、今晚夕食を食べるレストランを選択したり、新たに購入する PC を選択したり、という行為があげられる。しかしながら我々は、選択時点において、自らの興味や目的をはっきり認識できているとは限らず、しばしば、選択した対象を消費・利用しようとした際に、「こんなはずではなかった」という、目的と選択対象とのミスマッチが起こってしまい、選択に対する満足度が低下してしまうことがある。このような問題に対して、たとえば就活相談においては、アドバイザーがまず相談者に自らの将来イメージを具体化させるような支援を行っているように、人が選択を行う時点で、その興味を明確にさせるような支援が有効になると考えられる。これまでも、推薦システムのような選択行動の支援システムは複数提案されてきているが、これらの多くは、対象の持つ特徴を利用して選択候補の削減を支援するものとなっており、ユーザに対してその興味を意識させるようなアプローチはあまりとられてきていない。

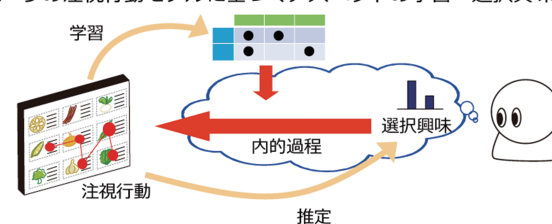
そこで本論文では、ユーザがカタログコンテンツ上の複数候補の中から対象を選択する状況を想定し、「何故選ぼうとしているのか」をユーザ自身が明確に意識するための対話的支援の基盤技術として、注視行動を用いた選択興味モデル化及び推定法を提案した。具体的にはまず、ユーザが対象群を閲覧する際の「物の見方」に着目し、アスペクトと呼ぶ概念を導入することで、これらアスペクトに対する重視度としてユーザの選択興味を定義した (図 1 (a))。さらに、トピックモデルの考え方を応用し、対象の持つ複数の属性値との関連度としてアスペクトを表現することで、ユーザがある選択興味を有する際に実際の注視行動が現れる過程を確率的生成モデルとしてモデル化し、複数ユーザの注視行動から、その背後に共通するアスペクト自身をデータドリブンに学習し、学習されたアスペクトに基づいて各ユーザの選択興味を推定するという枠組みについて提案した (図 1 (b))。

本論文では、ユーザの注視行動をモデル化するに当たって、(1) ユーザは対象の持つ全ての属性に同時に着目していない、(2) ユーザの注視行動は、コンテンツ内に配置されている対象の配置による影響も受けて振舞う、という 2 つの課題に特に取り組んだ。まず (1) については、ユーザが「いつ」「どの属性に」着目して比較行動を行っているかを注視行動から検出する手法を提案した (図 1 (c))。この手法を適用することで、ユーザの比較行動の背後にあるアスペクトを獲得し、選択興味を適切に推定できることを示した。次に (2) については、ユーザの注視行動モデルを内的要因と外的要因の混合モデルとして拡張することによって (図 1 (d))、外的要因を切り分けてユーザの選択興味 (内的要因) が推定できることを示した。最後に、提案したアスペクトおよび選択興味の推定法を実際に対話的支援に適用した際の有効性を報告した。

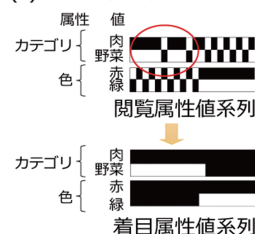
(a) ユーザの内的状態表現



(b) ユーザの注視行動モデルに基づくアスペクトの学習・選択興味の推定



(c) 着目属性値検出



(d) 外的要因を考慮した注視行動モデル

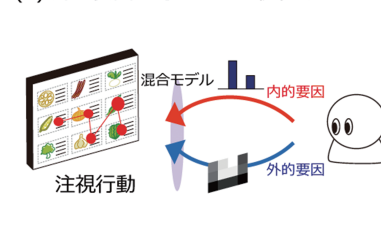


図 1 提案する注視行動および選択興味のモデル化算結果

Ilmiawan Shubhi (原田博司教授)

[Performance Enhancement of MIMO Transmission Techniques with Limited Number of Receive Antennas]

(受信アンテナ数制約下での MIMO 伝送技術の特性改善)

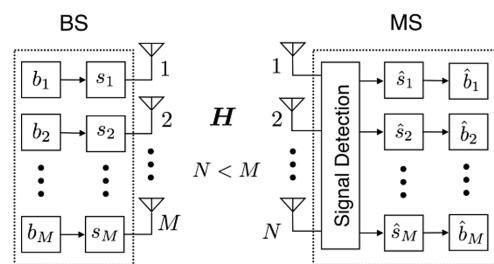
平成 29 年 9 月 25 日授与

In recent years, multiple-input multiple-output (MIMO) transmission has been considered as one of the key solutions in fulfilling the drastic data rates increase in wireless communications. Using MIMO, the capacity of radio link can be significantly increased by exploiting multipath propagation using multiple transmit and receive antennas. The benefits of MIMO transmission, however, might be restricted due to the physical constraint which limits the number of antennas that can be embedded on a user terminal. Considering this limitation, three approaches can be taken, and are investigated throughout this thesis.

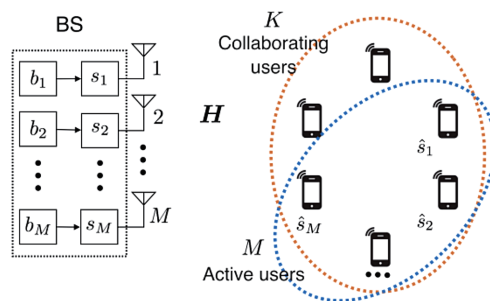
First, the user can be forced to handle multiple transmit antennas transmission although the number of receive antennas is smaller than that of transmit antennas. In this scenario, however, the performance of the detection and decoding processes degrade significantly. To tackle this issue, a novel decoding technique is proposed in Chapter 2 of this thesis. In the proposed technique, rather than conducted separately, the decoding process is conducted jointly between streams. Using the proposed technique, the bit error rate (BER) performance and the throughput of the system can be significantly increased.

Second, multi-user (MU) MIMO with collaborative interference cancellation (CIC) can be used. In this approach, neighboring user terminals share their received signals to improve their detection capabilities. The signal exchanges between users, however, are resource consuming. Therefore, a user selection technique is considered in this thesis to reduce the number of signal exchanges. Specifically, a user selection technique suitable for the QR decomposition-based maximum-likelihood detection with M-algorithm (QRM-MLD) is proposed. In addition, field experiments are also conducted to verify the effectiveness of MU-MIMO with CIC. Both of the user selection techniques for QRM-MLD and the field experiment results of the MU-MIMO with CIC are discussed in Chapter 3.

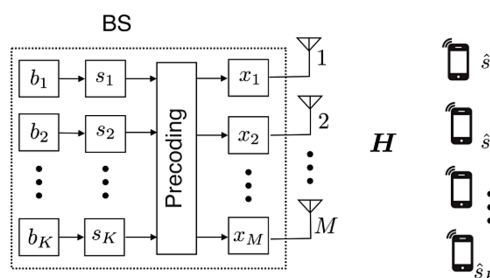
Third, a scenario when the MU-MIMO employs precoding for interference cancellation is considered. In this scenario, the inaccuracy of channel state information (CSI) caused by the channel aging, causes the signal to be phase-shifted and interuser interference occurs. To tackle this issue, a novel power allocation technique which could minimize the total interference of all users is proposed in Chapter 4. Specifically, the larger power will be allocated to the users experiencing larger Doppler spread, while the smaller power will be allocated to the users experiencing smaller Doppler spread. Using the proposed technique, the BER performance of users experiencing large Doppler spread can be improved while maintaining the BER performance of user experiencing small Doppler spread. In summary, each approach which is taken to tackle the issue of limited number of receive antennas in MIMO systems has its own challenge. However, as presented in this thesis, those challenges can be overcome, e.g. by using the proposed techniques. MIMO transmission, therefore, still become one of the most prominent techniques for the future wireless communication systems.



(a) Overloaded MIMO



(b) MU-MIMO with CIC



(c) MU-MIMO with precoding.

Fig. 1. Three approaches of MIMO techniques under limited number of receive antennas.

藤 原 純（原田博司教授）

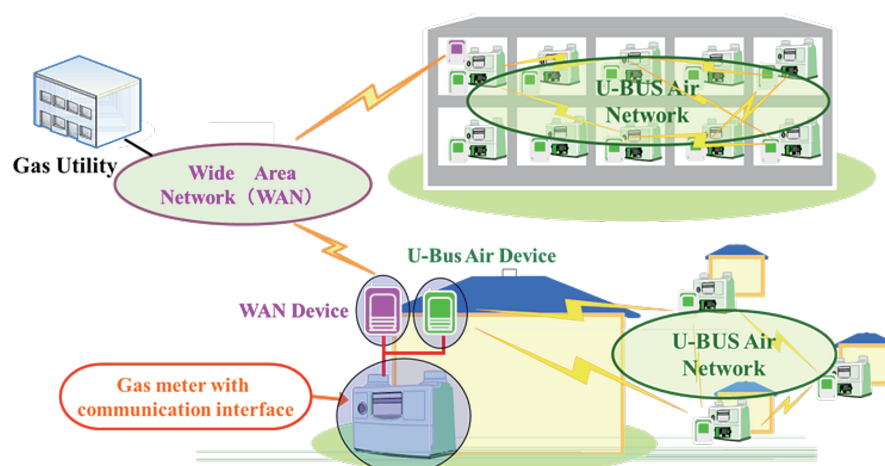
「ガススマートメーター用低消費電力通信プロトコルに関する研究」

平成 29 年 9 月 25 日授与

本論文では、ガススマートメーターの Wi-SUN（Wireless Smart Utility Networks）化による本格普及を目的とし、10 年以上電池駆動が可能な低消費電力性とアドホック性を両立できるマルチホップ無線ネットワークプロトコルを実現するために、IEEE802.15.4e で標準化を行ってきた RIT（Receiver Initiated Transmission）方式と呼ばれる MAC（Media Access and Control）プロトコルをベースにした新しい MAC プロトコルである F-RIT（Feathery- Receiver Initiated Transmission）プロトコルを提案している。F-RIT プロトコルは RIT プロトコルの低消費電力性能、耐干渉性能を改善し、各種機器への実装を考慮した MAC プロトコルである。本論文において、理論解析、計算機シミュレーション、実装評価を行う事により、F-RIT プロトコルが、ガススマートメーター用に標準化されたネットワークプロトコル（U-Bus Air）に必要とされる MAC プロトコルの要求性能を具備することを明らかにした。得られた成果を以下に示す。

1. IEEE 802.15.4e では Coordinated Sampled Listening（CSL）プロトコルおよび RIT プロトコルの 2 つの低消費電力 MAC プロトコルが規格化されているが、それぞれの特徴を定性的に類型化し、ネットワークを構築した場合におけるアドホック性および電波利用効率の両立性を比較することにより RIT プロトコルのガススマートメーターの Wi-SUN 化における好適性を示した。
2. RIT および CSL プロトコルについて理論解析と計算機シミュレーションによる伝送特性評価を行い、ガススマートメーターを Wi-SUN 化する場合に、RIT プロトコルが優位になる使用条件を定量的に導出した。
3. RIT プロトコルに改良を図り、より低消費電力性能、耐干渉性能を向上した F-RIT プロトコルを創案し、理論解析および計算機シミュレーションによる伝送特性および消費電力特性の評価を行い、ガススマートメーターに具備すべき実使用環境での要求仕様を満たすことが可能であることを定量的に示した。
4. これらの結果を基に、汎用の Wi-SUN ハードウェアモジュールに実装可能な F-RIT プロトコルを詳細設計し、市場流通している Wi-SUN モジュールに F-RIT プロトコルを実装、評価することにより、スマートメーターで必要とされる伝送性能および低消費電力性能が達成できることを実証した。

上記の成果により、U-Bus Air を商用化するにあたり、IEEE で国際標準化された低廉で調達が容易な汎用無線モジュールの利用が可能となり、ガススマートメーターの Wi-SUN 化が促進されることが期待される。本論文で示された成果は、今後のガススマートメーターの本格普及への寄与という本研究目的を達成した。



図：ガススマートメーターのネットワーク構成

芝 原 光 樹 (守倉正博教授)

「Advanced Signal Processing for Fiber-Optic Communication Systems Scaling Capacity Beyond 100 Tb/s」

(光ファイバ通信システムの 100Tb/s 容量限界の克服へ向けた信号処理技術)

平成 29 年 9 月 25 日授与

ICT は現在の情報社会を根幹から支える基盤となっており、光ファイバ通信システムはそれに伴う莫大なトラフィック需要に応えるものとして目覚ましい発展を遂げてきた。今後も継続して見込まれるトラフィック需要の増加に応える為に通信容量の更なる拡大は喫緊の課題であり、革新的な次世代大容量光ファイバ通信システムの研究開発の重要性が益々高まっている。本論文では、ファイバあたりの通信容量を 100 Tb/s 以上へスケールする次世代大容量光ファイバ通信システムの実現を目指し、光信号伝送およびシステムにおける複数の革新的技術の提案、数値計算、実証実験を通じた検討を行った。本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. 光通信システムで確率的に振る舞いシステム設計を複雑化させる偏波依存損失に対し、偏波依存損失が示す波長間の周波数独立性を利用する波長インタリーブ伝送を提案した。提案方式によりシステム不稼働確率の低減効果が得られることを、伝送実験の結果および極値統計の手法を用いることで実証した。
2. ポスト 100G の信号構成として検討されている複数サブキャリアから構成されるスーパーチャネル伝送方式に対し、構成サブキャリアの品質を平準化する信号処理方式を提案した。数値計算により、提案方式が多重的な帯域狭窄化による信号の品質影響の低減効果をもたらすことを実証した。
3. 線形光学効果起因の信号歪の補償を目的とし、光デバイスと信号処理の両輪のアプローチから検討した。まず、分散補償系光通信システムを想定し、相互位相変調抑圧器とデジタル後方伝搬法 (DBP) との連携効果を評価した。次に、相互位相変調の効果から生じる偏波間クロストークについて、独立成分分析に基づくクロストーク除去アルゴリズムを提案した。数値計算により、提案アルゴリズムが従来法を上回るパフォーマンスを示すこと、および提案アルゴリズムと DBP の併用時の連携効果を示した。
4. 周波数利用効率 (SE) の向上を目的とした光信号キャリアを高密度多重するスーパーナイキスト伝送方式において、光信号キャリアの周波数重畳によって生じるキャリア間クロストークを、レプリカ信号の生成と線形フィルタ処理により繰り返し除去する方式を提案した。さらに、誤り訂正符号との組み合わせにより、キャリア間間隔を圧縮し SE 向上が達成できることを、実験結果を用いて実証した。
5. 伝送媒体を既存のシングルモードファイバから空間多重 (SDM) ファイバへ代えた SDM 光ファイバ通信システムについて 3 つの新規信号処理方式の検討を行った。まず、並列 Multiple-input multiple-output (MIMO) 周波数領域等化方式が、モード分散に対する信号処理量を大幅に低減することを示した。さらに、本方式を用いた世界初の 527km に渡る 36 高密度 SDM 伝送の実験実証を行った。次に、モード依存損失の影響低減を目的とした、モード間での信号品質平準化を可能にする MIMO 信号処理方式を提案し、実験実証を行った。最後に、モード依存損失に起因するモード間クロストークに対し、非レプリカ生成型逐次干渉キャンセラを提案した。本方式が干渉キャンセルの為にチャネル推定や逆行列演算が不要という特長を持つことを示し、モード多重伝送実験の結果を用いて本方式の有効性を実証した。

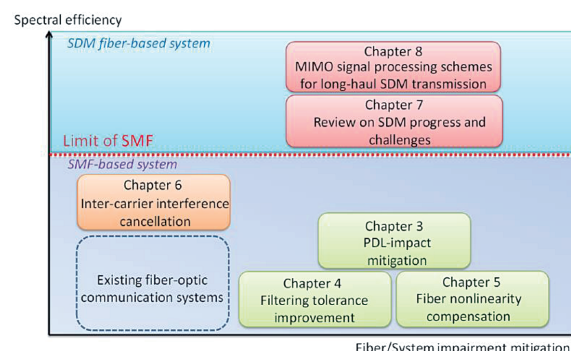


図 1. 本論文における章構成と検討の方向性